

Attorney Docket: 31775-210910

CERTIFICATE

I, Isolde U. Wasley, hereby declare that I am familiar with the English and German languages and am a professional translator from German into English and am employed as a translator in the Office of VENABLE LLP, 575 7th Street, N.W., Washington, DC 20004-1601;

That I have prepared a translation of PCT Application PCT/EP2003/007819, filed July 18, 2003 and entitled "VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON PHOTOLACK-STRUKTUREN " [Method For The Production Of Photoresist Structures], said translation thereof being attached thereto and made a part of this declaration.

To the best of my knowledge and belief, the above translation is accurate and fairly reflects the contents and meaning of the original document.

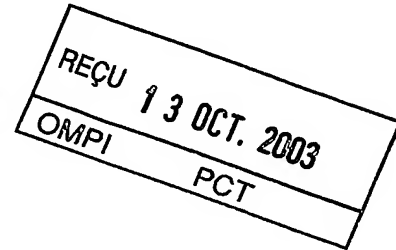
I declare under penalty of perjury under the laws of the United States of America that the foregoing is true and correct.

Executed on November 19, 2004

Isolde U. Wasley

Isolde U. Wasley

Best Available Copy



#2

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 33 309.2

Anmeldetag: 22. Juli 2002

Anmelder/Inhaber: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen

IPC: G 02 F, G 02 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 31. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Stück

Forschungszentrum
Karlsruhe GmbH
ANR 5661498

Karlsruhe, den 22. Juli 2002
PLA 0241 HG/HW

Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen

Forschungszentrum
Karlsruhe GmbH
ANR 5661498

Karlsruhe, den 22. Juli 2002
PLA 0241 HG/HW

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen bei dem eine Schicht aus Photolack (5) auf einem Träger mit vier verschiedenen Teilstrahlen eines Laserstrahls bestrahlt, wobei sich alle vier Teilstrahlen in einem Bereich innerhalb der Schicht aus Photolack (5) überlagern und dann einem Entwicklungsprozess unterworfen wird, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den vier verschiedenen Teilstrahlen und der Schicht aus Photolack mindestens ein optisches Teilprisma (3) angeordnet ist.
2. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Teilprisma (3) ein gleichseitiger Pyramidenstumpf verwendet wird.
3. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Pyramidenstumpf dreiseitig ist und die vier Teilstrahlen aus einem Halbraum kommen und eine dreizählige Symmetrie aufweisen.
4. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Dachkantprismen verwendet werden, die auf beiden Seiten der Schicht aus Photolack gegeneinander um 90 Grad verdreht und mit den Dachflächen nach Außen angeordnet sind.
5. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens einer der vier Teilstrahlen zirkular polarisiert ist.
6. Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Teilprisma und der Schicht aus Photolack (5) eine Immersionsschicht (4) liegt.

Beschreibung:

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen, wie es aus der WO 01/22133 A1 bekannt ist.

Ein mit einem dreidimensionalen Vielstrahl-Interferenzmuster, resultierend aus der Überlagerung mehrerer Lichtwellen, belichtetes (und entwickeltes,) photempfindliches Material kann als Partikelfilter, Effektbeschichtung von Oberflächen, Mikromischer oder als photonischer Kristall dienen.

Nach dem jetzigen Kenntnisstand reicht der Brechzahlunterschied zwischen Luft und Photolack (1:1,67 bei dem Photolack SU-8) nicht aus, um eine vollständige dreidimensionale Bandlücke im photonischen Kristall zu erzielen. Durch Auffüllen (sog. Infiltration) der Poren der Photolackstruktur (Templat) mit einem transparenten und hochbrechenden Material und nachfolgendem Entfernen des Photolackes kann jedoch ein photonischer Kristall mit vollständiger dreidimensionaler Bandlücke hergestellt werden. Hierzu ist erforderlich, daß sowohl die Poren, als auch das „Photolack-Gerippe“ jeweils zusammenhängend sind. Die Poren müssen miteinander verbunden sein, damit zum einen der weniger belichtete (unterbelichtete) Photolack herausgelöst werden kann und zum anderen die Poren anschließend mit hochbrechendem Material befüllt (infiltriert) werden können. Die Photolackstruktur muß topologisch zusammenhängend sein, damit sie mechanisch stabil ist und nicht in sich zusammenfällt.

Die erforderliche Brechzahl des einzufüllenden Materials ergibt sich aus Bandstruktur-Berechnungen unter der Maßgabe einer vollständigen dreidimensionalen Bandlücke. Solche Rechnungen liegen aktuell zwar nicht vor, es ist jedoch zu erwarten, daß die Brechzahl des infiltrierten Materials zwischen zwei und drei liegen muß. Daher kommen für die Infiltration z. B. verschiedene II-IV Halbleiter in Betracht.

Eine eingeschränkte Realisierung der Herstellung von Templaten mit einem Vielstrahl-Interferenz-Verfahren wurde von Turberfield (WO 01/22133 A1) beschrieben. Trotz einiger Beschränkungen hat dieser Ansatz gegenüber konkurrierenden Verfahren Vorteile.

Als konkurrierendes Verfahren kommt z. B. die übliche Herstellung von invertierten Opalen

z. B. A. Blanco et al., Nature 2000, Vol. 405, Seite 437, in Betracht. Verglichen mit diesen Templaten existiert bei der Vielstrahl-Interferenz-Methode eine viel größere Freiheit bei der Wahl der Gitterstruktur sowie bei der Wahl der in der Einheitszelle enthaltenen Basis. Außerdem bietet sich hier eine schnellere und billigere Produktionsmöglichkeit.

Ein weiteres eingeführtes Verfahren zur Herstellung entsprechender Strukturen verwendet Elektronenstrahl-Lithographie; diese Schicht-für-Schicht aufgebauten Systeme haben den Nachteil, daß sie seriell und deshalb langsam hergestellt werden. Sie sind deshalb vergleichsweise teuer, und bieten keine Perspektive für großflächige Strukturen mit vielen Perioden in die Tiefe.

Es ist darauf hinzuweisen, dass Turberfield mit dem oben genannten Vielstrahl-Interferenz-Verfahren fcc-Muster nur in Luft dargestellt hat. Im Innern des Photolacks entstand aufgrund der Brechung an der Luft-Photolack-Grenzfläche keine fcc-Struktur (I), sondern eine Struktur reduzierter Symmetrie, die für Anwendungen als Templat für photonische Kristalle mit vollständiger dreidimensionaler Bandlücke nicht geeignet ist.

Darüber hinaus hat Turberfield nur Vielstrahlinterferenzen mit linearen Polarisationen aller einfallenden Wellen betrachtet. Dies zeichnet jedoch unerwünschter Weise über den zentralen Referenzstrahl eine Raumrichtung besonders aus und führt so zu einer ungünstigen Reduktion der Symmetrie der Einheitszelle.

Der aktuelle Stand des Wissens [K. Busch, S. John, PRE 1998, 58, Seite 3896] lässt eine fcc-Struktur besonders erfolgversprechend erscheinen.

Aufgabe der Erfindung ist es, das e. g. Verfahren derart auszugestalten, dass photonische Kristalle mit vollständiger dreidimensionalen Bandlücke erzeugt werden können.

Gelöst wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Patentanspruchs 1. Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

Ein besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass alle und nicht nur einige ausgewählte zudem noch weniger interessante Bravais-Gitter in drei Dimensionen können dargestellt werden, insbesondere auch fcc-Strukturen. Es besteht zusätzlich eine größere Wahlfreiheit bei der Form der Basis.

Im folgenden beschreiben wir, mit Hilfe der Figuren, eine erweiterte und verbesserte Version des genannten Vielstrahl-Interferenz-Verfahren („dreidimensionale holographische Lithographie“), das die genannten Nachteile nicht mehr aufweist: Dabei zeigt die Fig. 1 Die Vergrößerung des Strahlwinkels in einem Substrat über den Gernzwinkel der Totalreflexion und die Fig. 2 einen schematischen Schichtaufbau für das Verfahren.

Beim Ausführungsbeispiel wurden kommerziell erhältliche Negativ-Photolacke verwendet.

Diese werden auf Glassubstrate (Durchmesser 25 mm, Dicke 5-7 mm) mit einer Lackschleuder aufgebracht (sog. „Spincoating“). Hierbei variierte die Umdrehungsgeschwindigkeit der Lackschleuder wie folgt: Zu Beginn für die ersten 10 Sekunden 500 U/min und dann für die Dauer von 30 Sekunden 3500 U/min oder 9000 U/min. Damit erreicht man Schichtdicken von circa 10 μm . Nach diesem Beschichtungsschritt wird die Probe mindestens 30 Minuten lang ruhend bei Umgebungsbedingungen gelagert.

Um das Lösungsmittel weitgehend zu entfernen, wird die Probe anschließend in einem Konvektionsofen für circa 1 Stunde bei 65° C gebacken (sog. „Soft Bake“). Hernach wird die Probe wiederum für circa 30 Minuten bei Umgebungsbedingungen gelagert. Danach ist die Schicht in einem stabilen Zustand.

Die nachfolgende Belichtung im Mehrstrahl-Interferenz-Aufbau erfolgt in der sog. „regenschirmartigen“ Anordnung („Umbrella-like Configuration“) [K. I. Petsas et al., PRA 1994, 50, Seite 5173]

In dieser Vierstrahl-Konfiguration liegen drei der Strahlen (bzw. Wellenvektoren der Wellen) gleichmäßig verteilt auf einem Kegelmantel, wobei alle drei Wellenvektoren zur Spitze des Kegels hin zeigen. Ein weiterer Strahl (im folgenden „Referenzstrahl“

genannt) liegt auf der Achse des Kegelmantels und weist ebenso zur Spitze des Kegelmantels hin. Die vier zueinander kohärenten Strahlen erhalten wir durch Aufteilung des Strahles eines Lasers mittels Strahlteilern.

In unserem Experiment ist der Laser ein gütegeschalteter, frequenzverdreifacher (d. h. 355 nm Wellenlänge), durch "seeding" longitudinal einmodiger Nd:YAG-Pulslaser. Durch die Impulsdauer von circa 6 ns wird zum einen Verwackelungsunschärfe und zum anderen eine Brechzahländerung des Photolackes während der Belichtung vermieden.

In unserem Aufbau können die Intensität und die Polarisierung jedes Teilstrahles getrennt eingestellt werden. Dies bedeutet insbesondere, dass die Strahlen linear, zirkular oder elliptisch polarisiert werden können. Eine von uns verwendete neue Möglichkeit besteht darin, dass der „Referenzstrahl“ zirkular und die restlichen Strahlen linear, und zwar in ihrer jeweiligen Einfallsebene (sog. p-Polarisation) polarisiert sind. Durch die zirkulare Polarisierung des Referenzstrahles erreichen wir eine höhere Symmetrie der Basis, als bei linearer Polarisierung des Referenzstrahles. Das Verhältnis der Intensitäten beträgt bei uns aktuell 1,5:1:1:1 für Referenzstrahl : Strahl Nr. 2 : Strahl Nr. 3 : Strahl Nr. 4.

Mit diesen Strahlen belichten wir den Photolack mit einem einzelnen Laser-Impuls. Die für diese Belichtung notwendige Impulsenergie (vor der Aufteilung in vier Teilstrahlen) beträgt circa 8 mJ. Bei einer Strahl-Querschnittsfläche von circa einem halben cm² beträgt die über den Querschnitt des Laserstrahls gemittelte Energie pro Fläche circa 16 mJ/cm². Dies führt zu einem Füllfaktor der Template von circa 50%.

Um eine fcc-Struktur im Photolack zu generieren, muss der Öffnungswinkel γ des Kegelmantels im Innern des Photolackes die Bedingung $\gamma = \arccos(7/9) \approx 38,94^\circ$ erfüllen. Dieser nicht ohne weiteres realisierbare innere Winkel wird hier erreicht durch Vorschalten eines speziell entworfenen Prismas: Dieses ist ein modifizierter Retroreflektor, bei dem die Spitze entfernt und die Schnittfläche poliert wurde. Die Strahlführung ist im Detail in der Figur 2 dargestellt.

Das Licht 1, 2 wird vom Einkoppel-Prisma 3 in den Photolack 5 über eine Schicht 4 aus destilliertem Wasser geleitet, das als Immersionsflüssigkeit dient.

Um Rückreflexe von der Unterseite des Substrates 6 zu unterdrücken, schließt ein schwarz eloxiertes Aluminiumblech 8 als Absorberschicht den Strahlengang ab. Zwischen Substrat 6 und Absorberschicht 6 befindet sich Öl als Immersionsschicht 7. Ohne diese Maßnahme würden der Referenzstrahl 1 teilweise und die anderen drei Strahlen 2 total reflektiert und sich der Interferenzstruktur störend überlagern.

Der mit dem Interferenzmuster belichtete Photolack wird zur Polymerisation in einem Konvektionsofen für ca. 6 Minuten gebacken, wobei die Temperatur von ca. 65° C auf ca. 92° C ansteigt (sog. "Post Exposure Bake"). Nach Herausnahme aus dem Ofen und Abkühlung lassen wir die Probe wiederum für mindestens 30 Minuten ruhen.

Die Proben werden zur Entwicklung für circa 30 Minuten bis eine Stunde in einem Bad mit SU-8-Entwickler (genaue Bezeichnung =) (enthält 1-Methoxy-2-propyl-acetat) ruhend stehen gelassen. Da die SU-8-Filme im Entwicklerbad weich (galerteartig) sind und auch nur schwach auf dem Substrat haften, vermeiden wir Flüssigkeitsbewegungen. Durch den Entwicklungsprozess werden die schwach belichteten Bereiche des Photolacks im Entwickler aufgelöst, die stärker belichteten hingegen bleiben stehen (SU-8 ist ein sog. „negativer“ Photolack). Mit einer Pipette wird der Entwickler sodann vorsichtig abgesaugt.

Um den Entwicklungsprozess abzuschließen wird zunächst ein Tropfen Iso-2-Propanol auf den Photolack gegeben. Danach wird mit Iso-2-Propanol aufgefüllt. Um eine Durchspülung der Hohlräume zu unterstützen, schwenken wir das Gefäß vorsichtig für circa fünf Minuten. Danach lassen wir die Proben für einige Minuten an Luft trocknen.

Die Proben zeigen Risse, die wegen der ungleichmäßigen Volumenänderung (Quellung bzw. Schrumpfung) während des Entwicklungsprozesses auftreten. Manchmal löst sich die Probe ganz oder teilweise vom Substrat; Template stehen dann auch substratfrei zur Verfügung.

Mit den bisher bekannten Verfahren zur Erzeugung von 3-dimensionalen Photolack-Strukturen mittels Vielstrahl-Interferenzen konnten nicht alle Bravais-Gitter dargestellt werden. Dies gilt insbesondere für das im Hinblick auf eine dreidimensionale vollständige Bandlücke interessante fcc-Struktur. Der Grund für die Defizite ergibt sich aus Details des Strahlenganges beim Eintritt des Lichtes in den Photolack.

Diese werden in Figur 1 dargestellt. Durch die Brechung an der Luft-Photolack-Grenzfläche wird ein Lichtstrahl mit dem Einfallswinkel α zur Oberflächennormale (Lot) des Photolacks in den Photolack gemäß dem Snellniusschen Brechungsgesetz gebrochen: $\sin(\alpha) = n_{\text{Photolack}} \times \sin(\gamma)$, wobei γ den Winkel des gebrochenen Lichtstrahles bezüglich der Oberflächennormalen im Innern des Photolacks bezeichnet ($n \approx 1,67$ für den verwendeten Photolack).

Um z. B. eine fcc-Struktur darzustellen, müßte $\gamma_{\text{fcc}} = \arccos(7/9) \approx 38,94^\circ$ betragen. Dem steht zunächst die Totalreflexion entgegen, denn der Grenzwinkel γ_{Grenz} für den Photolack beträgt $\gamma_{\text{Grenz}} = \arcsin(1/n_{\text{Photolack}}) \approx 36,78^\circ < \gamma_{\text{fcc}}$. Dies hindert daran, ohne weiteres den inneren Winkel γ_{fcc} (und überhaupt alle Winkel $\gamma > \gamma_{\text{Grenz}}$) zwischen dem Referenzstrahl und den anderen drei Strahlen bei direkter Einstrahlung aus Luft zu realisieren. Daher sind die fcc-Struktur und beispielsweise auch die einfach kubische Struktur sc ($\gamma_{\text{sc}} = \arccos((\sqrt{3})/6) \approx 73,22^\circ$) durch Belichtung direkt aus Luft nicht darstellbar.

Außerdem bestand bei Beschränkung auf lineare Polarisationen für alle Strahlen nur eine eingeschränkte Wahlmöglichkeit der Basis (Inhalt der Wigner-Seitz-Zelle) der Kristallstruktur.

Durch Vorschalten eines speziell entworfenen Prismas: Dieses ist ein modifizierter Retroreflektor, bei dem die Spitze entfernt und die Schnittfläche poliert wurde. Dadurch wird es ermöglicht, in den Photolack Wellenvektoren einzubringen, so dass alle Bravaisgitter erzeugt werden können. Insbesondere kann ein fcc-Gitter dargestellt werden.

Das Einbringen von [geeigneten Pol.-Komponenten] je einem drehbaren Halbwellenplättchen und wahlweise zusätzlich nachgeschaltet einem drehbaren Viertelwellenplättchen in jedem der Teilstrahlen gibt eine erhöhte Flexibilität bei der Wahl der Basis der Kristallstruktur.

Es wird ein speziell entworfenes Einkopplungselement für die Einkopplung der Laserstrahlen in das Innere des Photolacks vorgeschlagen. Durch die Verwendung von im allgemeinen elliptischer Polarisation (im Gegensatz zu Turberfield, der nur lineare Polarisationen verwendet), die zudem für jeden der Teilstrahlen unterschiedlich gewählt werden kann, ergeben sich vielfältige zusätzliche Möglichkeiten bei der Wahl der Basis der Struktur.

Ein Spezialfall des von uns beschriebenen Verfahrens besteht darin, nur drei Teilstrahlen zu verwenden. Dadurch können zweidimensionale Photolack-Strukturen mit kleineren Gitterkonstanten als bei direkter Einstrahlung auf die Luft-Photolack-Grenzfläche realisiert werden.

Durch Verwendung eines positiven statt eines negativen Photolackes erhält man die jeweils invertierte/komplementäre Struktur, die sich bei Verwendung eines negativen Lackes ergibt.

Wegen der Absorption des Lichtes bei Propagation durch den Photolack ergibt sich eine Abnahme der Lichtintensität längs der Propagationsrichtung und damit die weitere Möglichkeit einer Variation des Füllfaktors mit der Tiefe („Verlaufs“-Struktur).

Durch geeignete Zusätze zum Photolack oder Auftragen mehrerer Schichten verschiedener Lacke, deren Lichtempfindlichkeit sich unterscheidet, kann die Absorption und damit die Stärke der Variation mit der Tiefe strukturiert werden. Umgekehrt führt eine Vermeidung von Absorption z. B. durch Reinigung mit Entfernung absorbierender Beimischungen zu einer homogenen Struktur.

Ein modifizierter Photolack (z. B. mit einem anderen Anteil an lichtempfindlicher Komponente) oder ein gereinigter Photolack oder andere Lacksorten könnten eine homogenere Belichtung des Lackes in die Tiefe hinein ermöglichen.

Ein gezieltes Ablösen des Templates vom Substrat erreicht man durch Einbringen in ein Bad mit erwärmter (gegebenenfalls kochender) Salzsäure.

Spezialprismen:

Alle Teilstrahlen erfahren beim Eintritt aus Luft in das Prisma mehr oder weniger starke Reflexionsverluste. Diese könnte man dadurch unterdrücken, dass alle Eintrittsflächen mit für die Einfallswinkel und die jeweilige Polarisation geeigneten Antireflexschichten versehen werden.

Für einen gegebenen inneren Winkel im Photolack und den (davon wegen der anderen Brechzahl i. a. abweichenden) Winkel im Prisma können die drei schräg stehenden Eintrittsflächen so orientiert hergestellt werden, dass die Strahlen gerade bei senkrechtem Eintritt in die Seitenflächen des Prismas den gewünschten Winkel im Photolack ergeben. Auf diese Weise würde eine Antireflex-Beschichtung besonders einfach, weil sie unabhängig von der Strahlpolarisation wird. Außerdem läßt sich die korrekte Einstrahlrichtung besonders leicht und genau kontrollieren, weil der (immer – auch bei Antireflexbeschichtung – vorhandene) restliche Rückreflex als Indikator genutzt werden kann: Die Reflexion eines Strahles in sich („Retroreflexion“) ist besonders einfach und genau einstellbar und auch verifizierbar.

Eine Abwandlung besteht darin, daß die drei seitlichen Eintrittsflächen gerade so orientiert werden, daß sie bezüglich der eintretenden Strahlen gerade unter dem Brewster-Winkel stehen. Dann läßt sich die korrekte Einstellung des Winkels sehr präzise als Verschwinden der Reflexion des Strahles erkennen, wozu dieser (u. U. vorübergehend) p-polarisiert gemacht werden muß. Wird eine andere als p-Polarisation für die Belichtung benötigt, so ist nach der Richtungs-Einstellung die erforderliche Polarisation durch Drehen der betreffenden Verzögerungsplatten einzustellen; da diese Platten sehr genau gefertigt werden können, ergibt sich dadurch keine störende Richtungsänderung des Strahles.

Eine weitere Abwandlung ergibt sich, wenn man alle vier Strahlen zueinander parallel einrichtet, wobei sie gegeneinander seitlich versetzt sind. Die Eintrittsflächen des Prismas sind so orientiert herzustellen, daß sich die erforderlichen Winkel durch Bre-

chung beim Eintritt in das Prisma ergeben. Die erforderliche Konstellation der Strahlen läßt sich mit hoher Genauigkeit beispielsweise durch Planparallel-Platten geeigneter Dicke verwirklichen. Die korrekte Richtung für alle vier Strahlen ist genau dann gegeben, wenn nur für den Referenzstrahl für Retroreflexion gesorgt wird. Die Aufgabe zur präzisen Winkелеinstellung zwischen den vier Strahlen wird auf diese Weise fast vollständig auf die sehr gut beherrschte Herstellung berechneter Winkel bei der Prismenfertigung übertragen.

Anstelle des abschließenden Absorbers kann man auch zusätzlich ein analoges Prisma [gleich wie oder auch anders als für die Einkopplung] zum Auskoppeln der Lichtstrahlen, die den Photolack und das Substrat bereits durchlaufen haben, verwendet werden. Diese ausgekoppelten Strahlen stehen dann für weitere Analysen zur Verfügung, z. B. würde dies eine Kontrolle der Polarisationszustände der Teilstrahlen ermöglichen.

Der Photolackfilm kann direkt auf die Unterseite des Einkoppel- oder auf die entsprechende Seite des Auskoppel-Prismas aufbringen. Es entfällt eine Wasser- oder Öl-Index-Anpassungs-Schicht. Dies kann wichtig sein, wenn die Index-Anpass-Flüssigkeit den Photolack angreift, wie beispielsweise bestimmte Öle.

Substrat umdrehen: Einstrahlung von der sehr ebenen Seite des Films, die auf dem Substrat perfekt aufliegt, statt von der „freien“ {weniger perfekten} Fläche des „aufgespinnnten“ Films.

Durch ungleichmäßige Volumenänderungen beim Entwicklungsprozess ergeben sich Risse im Photolackfilm auf einer makroskopischen Skala. Die Fläche der resultierenden Bruchstücke beträgt circa ein Quadratmillimeter. Die Form der Bruchstücke kann durch gezieltes Einbringen von Ritzen (im Sinne von Soll-Bruchstellen) in den Photolack vor oder nach der Belichtung kontrolliert werden.

Gezieltes Abdecken von Bereichen („Maskierung“) während der Belichtung des Films, so daß nur ein Teil des Interferenzmusters im Photolack abgebildet und konserviert wird, ergibt Template wählbarer Randform. Dieses Vorgehen ist sowohl bei positiven als auch bei negativen Photolacken von Interesse, weil die unbelichteten –

durch die Maskierung abgedeckten – Teile entweder stehen bleiben oder aufgelöst werden.

Durch strukturierte Vorbelichtung des Photolackes mittels einer konventionellen Maskentechnik kann der Photolack auf bestimmten Bereichen überbelichtet werden. Danach wird die oben beschriebene Vielstrahl-Interferenztechnik auf die noch unbelichteten Partien angewendet. So entsteht ein Photolacktemplat inmitten voll belichteter Bereiche. Dies würde eine bessere Handhabung des resultierenden Photolacktemplates ermöglichen, insbesondere dann, wenn die gesamte Photolackschicht vom Glassubstrat abgelöst wird. Durch Wechsel zu positivem Photolack sind jeweils komplementäre Situationen realisierbar.

Auf eine SU-8-Schicht die durch eine UV-Lampe vollständig überbelichtet und danach entwickelt und fixiert wurde („Haftschicht“) (Passivierung), kann man eine weitere SU-8-Schicht aufbringen, die dann mit einem Interferenzmuster belichtet wird. Nach der Entwicklung dieser Schicht, die auf der Haftschicht liegt, erhält man ein Templat, das nach Ablösung vom Glassubstrat auf einer Vollmaterial-Schicht (Haftschicht) liegt. Diese Haftschicht bildet dann ein Substrat von geringer Dicke aus der gleichen chemischen Zusammensetzung wie die Photolack-Struktur.

Bei Propagation des Referenzstrahles in die entgegengesetzte Richtung als die oben beschriebene erhält man andere Strukturen, insbesondere Spiralstrukturen.

Die Strahlen fallen schräg in den Photolack ein. Dadurch ist der effektive Strahlquerschnitt anders als derjenige des ursprünglichen (z. B. runden) Strahls. Außerdem ist der allen vier Strahlen gemeinsame Raum im Photolack nicht identisch mit den effektiven Strahlquerschnitten. Eine nominell perfekte Superposition aller vier Wellen erreicht man dadurch, daß man die Wellen mit üblichen optischen Elementen (z. B. anamorphisches Prismenpaar) einzeln in ihrem Querschnitt derart vor-verformt, daß sie durch den schrägen Einfall effektiv kreisförmig werden.

Eine weitere Möglichkeit der Strahlkonfiguration besteht darin, den Laserstrahl in vier Teilstrahlen aufzuteilen, wobei die Wellenvektoren von zwei Strahlen in der

einen Ebene liegen und die Wellenvektoren der restlichen zwei Strahlen in einer Ebene senkrecht zur ersten. Das Wellen-Paar, deren Wellenvektoren in der einen Ebene liegen, propagiert dabei gegen das andere [K. I. Petsas et al., PRA 1994, 50, Seite 5173]. Die Winkelhalbierende zwischen zwei Teilstrahlen ist beiden Paaren gemeinsam.

Das folgende Beispiel von vier Vektoren ergibt, in der obigen Konfiguration eine fcc-Struktur:

$[2,0,1]$, $[-2,0,1]$, $[0,2,-1]$, $[0,-2,-1]$

Die Photolackschicht wird also von zwei Seiten (aus zwei Halbräumen, wobei die Photolackschicht diese voneinander trennt) belichtet. Daraus ergibt sich, dass die Strahlen nicht nur in den Photolack eingekoppelt, sondern auch wieder ausgekoppelt werden müssen. Dies wird dadurch erreicht, dass die Photolackschicht zwischen zwei Dachprismen liegt, wobei die Dachflächen nach außen zeigen und die Prismen um 90° gegen einander verdreht sind. Jedes dieser Dachprismen wirkt also für das eine Strahlenpaar als Einkopplungselement und soll gleichzeitig für das andere Strahlenpaar als Auskopplungselement dienen. Dies geschieht durch Abschrägen (Modifizieren) der senkrechten Seitenflächen der Prismen. (Durch jedes dieser modifizierten Dachprismen tritt das eine Strahlenpaar ein und das andere Strahlenpaar aus.)

Um das Licht ein- und wieder auszukoppeln braucht man zwischen dem einen modifizierten Dachprisma und der Photolack-Schicht bzw. zwischen dem Substrat und dem anderen modifizierten Dachprisma jeweils eine Schicht aus einer geeigneten Immersionsflüssigkeit.

Zusammenfassung:

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von photonischen Kristallen bei dem eine Schicht aus Photolack auf einem Träger mit vier verschiedenen Teilstrahlen eines Laserstrahls bestrahlt, wobei sich alle vier Teilstrahlen in einem Bereich innerhalb der Schicht aus Photolack überlagern und dann einem Entwicklungsprozess unterworfen wird.

Aufgabe der Erfindung ist es das Verfahren derart auszugestalten, dass photonische Kristalle mit vollständiger dreidimensionaler Bandlücke erzeugt werden können.

Gelöst wird diese Aufgabe dadurch, dass zwischen den vier verschiedenen Teilstrahlen und der Schicht aus Photolack mindestens ein optisches Teilprisma angeordnet ist.

Fig. 1

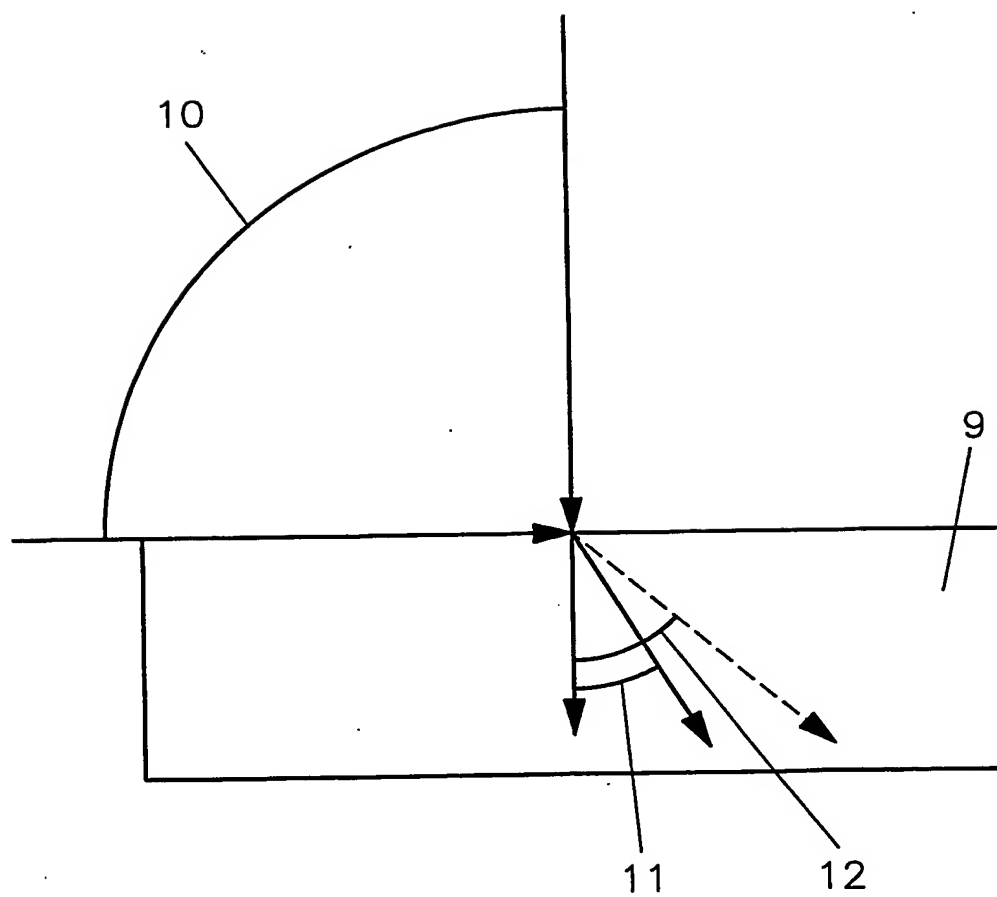
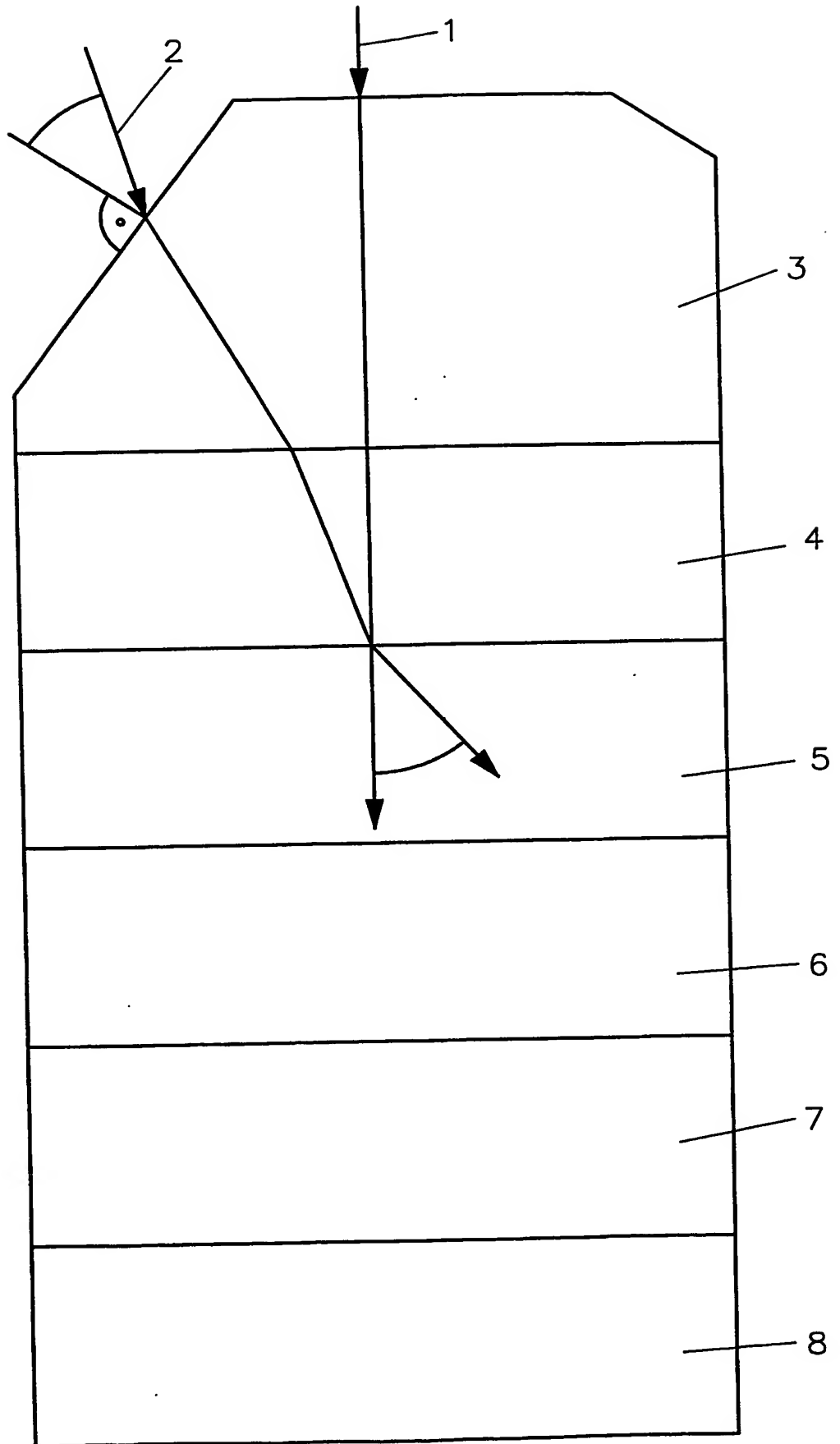


Fig. 2



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☒ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.